

**AFPP – CIETAP – CONFERENCE SUR LES TECHNIQUES D'APPLICATION
DE PRODUITS DE PROTECTION DES PLANTES**

LYON – 15 ET 16 MARS 2012

**MISE AU POINT D'UN SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE (SIG), À L'ÉCHELLE
DE LA PARCELLE, POUR L'ÉVALUATION DU RISQUE DE POLLUTION DES EAUX DE
SURFACE ET SOUTERRAINES PAR L'USAGE DES PESTICIDES**

B. BAH¹, Q. LIMBOURG¹, L. VANDENDAEL¹, B. HUYGHEBAERT², R. OGER¹

¹ Centre wallon de Recherches Agronomiques (CRA-W). Département Agriculture et Milieu Naturel. Unité de Fertilité des Sols et Protection des Eaux. Rue de Liroux, 9. B-5030 Gembloux (Belgique).

² Centre wallon de Recherches Agronomiques (CRA-W). Département Productions et Filières. Unité Machines et Infrastructures agricoles. Rue de Liroux, 9. B-5030 Gembloux (Belgique).

RÉSUMÉ

L'étude aborde la mise au point d'un outil SIG décisionnel, basé sur une approche « expert » par logique floue, pour l'évaluation du risque de pollution des eaux de surface et souterraines par les pesticides. Une enquête de terrain combinée aux propriétés physico-chimiques des pesticides, a permis d'identifier la pression polluante agricole liée aux propriétés des pesticides et aux activités anthropiques. La sensibilité des sols au transfert des pesticides vers les eaux de surface et souterraines a été évaluée sur base, d'une part d'une approche par modélisation mécaniste, et d'autre part à partir de l'exploitation de l'information qualitative de la carte des sols, jugée pertinente et non explicitement valorisée par le modèle mécaniste. L'évaluation du risque global a ensuite été réalisée à partir de la construction d'un système expert basée sur la logique floue, qui intègre les évaluations spécifiques aux propriétés des pesticides, aux pratiques culturales et à la sensibilité des sols au transfert des pesticides vers les eaux, en tant que milieu transit-vecteur. L'approche par « logique floue » est un outil robuste qui permet notamment d'agréger de façon uniforme des informations de sources variées, mais aussi d'intégrer l'incertitude (imprécision) associée à certaines données, telles que celles liées aux caractéristiques physico-chimiques des pesticides ou des sols.

Mots-clés : indicateur de risque, logique floue, Modélisation, pression anthropique, sol.

INTRODUCTION

La pollution des ressources en eaux par les produits phytopharmaceutiques, communément appelés pesticides, reste un problème majeur pour la gestion durable des eaux, tant à l'échelle nationale qu'européenne. Les directives et stratégies européennes en la matière, telles que la Directive Cadre sur l'Eau (Directive 2000/60/CE) (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2000) et la Stratégie thématique sur l'utilisation durable des pesticides imposent aux Etats membres de prendre les mesures nécessaires afin de limiter l'impact des pesticides sur l'homme et l'environnement (Commission des Communautés européennes, 2006). La pollution diffuse par les pesticides constitue un des principaux facteurs de risque de ne pas atteindre le statut de « bon état écologique » des eaux pour 2015, tel que le recommande la Directive Cadre sur l'Eau.

Des indicateurs d'impact des pesticides sont donc nécessaires pour évaluer et consolider les progrès faits en la matière. Afin d'aider les autorités à atteindre les objectifs imposés par la législation, notamment au niveau européen, le Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W) a initié le projet PESTEAX, qui vise la mise au point d'un système d'aide à la décision, basé sur un outil SIG (Système d'Information Géographique), pour l'évaluation du risque de pollution diffuse des eaux de surface et des eaux souterraines par les pesticides.

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

L'évaluation du risque de pollution des eaux de surface et souterraines dans le cadre du projet PESTEAX consiste à confronter la pression polluante (anthropique) exercée sur le milieu (plus particulièrement sur les sols) à la sensibilité intrinsèque des sols au transfert des pesticides vers les eaux.

$$\text{Evaluation risque PESTEAX} = \text{Pression polluante (anthropique)} \times \text{Sensibilité des sols au transfert des pesticides vers les eaux}$$

Trois modules d'évaluation du risque sont définis, selon la cible considérée :

- le module « Risque de pollution des eaux souterraines » : un indicateur de risque appelé « ResoPest » (pour Risque Eaux Souterraines Pesticides) est défini à partir de règles de décision basées sur la logique floue ;
- le module « Risque de pollution des eaux de surface par ruissellement » : un indicateur de risque appelé « ResuPest-RU » (pour Risque Eaux de surface Pesticides-Ruissellement) est défini à partir de règles de décision basées sur la logique floue ;
- le module « Risque de pollution des eaux de surface par érosion » : un indicateur de risque appelé « ResuPest-ER » (pour Risque Eaux de surface Pesticides-Erosion) est défini à partir de règles de décision basées sur la logique floue.

Pour chaque module nous avons défini un indicateur de risque (sans dimension) variant de 0 (pas de risque pour l'environnement) à 1 (risque maximum). Nous distinguons trois types de variables d'entrée : (i) les propriétés des pesticides et (ii) les caractéristiques du traitement qui définissent d'une part la pression polluante, ainsi que (iii) les conditions locales qui définissent la sensibilité des sols d'autre part. Il s'agit des critères qui influencent le devenir des pesticides dans l'environnement, et particulièrement leur transfert vers les eaux de surface et souterraines. Pour arrêter le choix de ces variables, nous avons d'une part pris en compte leur pertinence pour l'estimation du risque lié au transfert des pesticides vers les eaux, pertinence jugée à partir de données disponibles dans la littérature scientifique et sur base de dires d'experts, et d'autre part la disponibilité des données.

La pression polluante est évaluée en prenant en compte les propriétés physico-chimiques des substances actives, leurs modalités d'application (dose, nombre d'applications, ...) et leurs périodes d'application.

La sensibilité des sols aux transferts des pesticides vers les eaux de surface ou souterraines est évaluée à partir de l'estimation des concentrations en pesticides transportées respectivement vers les eaux de surface ou vers les eaux souterraines. Etant donné la complexité des phénomènes impliqués dans le devenir des pesticides dans les sols, les modèles mécanistiques, basés sur une description physique rigoureuse des processus de transferts, sont des outils potentiellement pertinents (Vanclooster et al., 2004). Ils permettent notamment de prédire les concentrations en pesticides sur et dans les sols (on parle des PEC - Predicted Environmental Concentration), qui sont susceptibles d'être transférés vers les eaux de surface et souterraines. Ils sont également recommandés et utilisés dans le cadre de l'homologation des pesticides (FOCUS, 2000).

Un système expert basé sur la logique floue est utilisé pour agréger les variables d'entrée des modules en indicateurs de risque. Il en sera fait ensuite de même pour agréger les indicateurs des différents modules en vue de définir un risque global. La logique floue permet de manipuler le concept de vérité partielle, autrement dit des valeurs de vérité intermédiaires entre complètement vrai et complètement faux. La théorie des ensembles flous a été développée par Zadeh (1965, cité par van der Werf et al., 1998) pour traiter l'incertitude du langage naturel. Elle peut servir à manipuler des classes ou des catégories vaguement définies. Trois éléments doivent être définis en ce sens : les classes floues, les fonctions d'appartenance et les règles de décision.

Pour toutes les variables d'entrée, deux classes « extrêmes » de vérité sont d'abord définies : la classe F (favorable pour la cible ; soit pas de risque de pollution de la cible par les pesticides) et la classe D (défavorable pour la cible ; soit un risque maximal de pollution de la cible par les pesticides). En d'autres termes, nous allons définir une gamme de valeurs pour laquelle la variable en question appartient à 100 % à la classe favorable (donc à 0 % à la classe défavorable), et une autre gamme de valeurs pour lequel la variable appartient à 100 % à la classe défavorable (0 % à la classe favorable). Entre ces deux classes extrêmes (F et D), il peut exister une catégorie « intervalle de transition », où la valeur d'appartenance à F va décroître de 1 (100 % d'appartenance à la classe F) à 0 (0 % d'appartenance à F) et où celle de D varie en sens inverse. Il s'agit de la classe floue.

En théorie des ensembles classiques, un élément est inclus dans un ensemble (une classe) ou il ne l'est pas. La transition entre les classes est abrupte. Tandis qu'en théorie des ensembles flous, à chaque valeur prise par la variable dans la classe floue, on attribuera un « degré d'appartenance » aux classes de vérité F et D au moyen d'une fonction d'appartenance. Cette fonction peut prendre toute valeur intermédiaire, « 0 » représentant la non-appartenance stricte, « 1 » l'appartenance entière, et les valeurs intermédiaires une appartenance partielle. La forme de la fonction d'appartenance de chaque variable est caractérisée par les deux valeurs limites de la classe floue. Nous utilisons dans cet intervalle une fonction linéaire.

Les règles de décision sont représentées à partir de clés (arbres) décisionnelles. Une règle de décision comporte deux prémisses (*si...*) reliées par « et », suivies par une conclusion (*alors...*). Chaque arbre traduit l'avis d'expert, en savoir et en jugement, par rapport au risque de pollution des eaux par les pesticides. Chaque branche de l'arbre est la combinaison des variables de l'indicateur. Notons que les règles décisionnelles sont construites en ne prenant en compte que les cas extrêmes « favorables » et « défavorables ». Ces règles décisionnelles aboutissent

chacune à la définition (conclusion), par l'expert, d'un indice de risque compris entre 0 et 1 (à ne pas confondre avec les valeurs des degrés d'appartenance à F ou D, comprises également entre 0 et 1), qui exprime donc le risque.

L'indicateur de chaque module est calculé à partir de la méthode d'inférence de Sugeno (1985 ; cité par van de Werf, 1998) qui revient à calculer la moyenne des conclusions des règles de décision, pondérées par leur valeur de vérité. La valeur de vérité (degré d'appartenance à F ou D) d'une règle (arbre) de décision pouvant être définie comme la plus petite valeur de vérité de ses prémisses.

LA PRESSION POLLUANTE

La pression polluante est définie sur base d'une double approche qui prend en compte d'une part la pression due aux propriétés physico-chimiques des pesticides et d'autre part la pression due aux pratiques agricoles.

La première approche consiste à définir un indicateur de pression « Pratiques agricoles ». Cet indicateur est défini à partir des résultats d'enquêtes effectuées auprès des agriculteurs de deux sous-bassins versants (Dyle amont et Mollignée amont) couvrants au total près de 10000 ha. Ces deux sous bassins versants ont été sélectionnés de par leur représentativité d'une agriculture intensive (Dyle) ou d'un contexte géomorphopédologique assez varié et reflétant les principaux types de sols rencontrés en Wallonie (Belgique méridionale).

Ces enquêtes ont permis d'acquérir des données qui seront utilisées dans l'évaluation du risque de la couche anthropique. Les variables retenues sont la couverture du sol par la plante, la période de traitement, la dose d'application et le type de culture (Tableau 1). La variable « type de culture » n'étant pas pertinente dans le cadre de la détermination du risque pour les eaux souterraines, mais bien pour les eaux de surface, deux indicateurs de pression « pratiques culturales » seront donc définis indépendamment et intégrés dans l'outil PESTEUX. Ainsi l'indicateur de risque « Pratiques agricoles » sera déterminé spécifiquement pour les eaux souterraines (ResoPest-pratic) au sein du module « ResoPest », sur base de trois variables, et pour les eaux de surface (ResuPest-pratic) au sein des modules ResuPest-RU / ER, sur base de quatre variables.

Tableau 1 : Définition des classes floues des variables du module « pratique culturales »
(Table 1 : Definition of fuzzy classes variables of « cultural practices » module)

VARIABLES	MODALITÉS	CLASSES
Couverture du sol par la plante (LAI)	LAI = 0 0 < LAI < 8,9 LAI > 8,9	Défavorable (D) Intervalle de transition (classe floue) Favorable (F)
Période de traitement	16 ^e – 24 ^e décade 7 ^e – 15 ^e décade 25 ^e – 33 ^e décade 34 ^e – 6 ^e décade	Favorable (F) Intervalle de transition (classe floue) Intervalle de transition (classe floue) Défavorable (D)
Dose d'application (g)	< 10 10 – 10 000 > 10 000	Favorable (F) Intervalle de transition (classe floue) Défavorable (D)
Type de culture	Non sarclée Sarclée Butée	Favorable (F) Moyennement à peu favorable Défavorable (D)

La deuxième approche consiste à définir un indicateur de pression lié aux propriétés physico-chimiques des pesticides, soit la forme chimique, la force de réaction, le pKa, le coefficient de partage carbone organique / eau (Koc), la durée de demi-vie (DT50), l'hydrolyse et le coefficient de partage octanol / eau (Log Kow). Ces huit paramètres sont intégrés à l'outil PESTEUX à partir d'une clé décisionnelle. Des classes floues ont été définies pour les variables « pKa », « Koc » et « DT50 ». Quant aux variables discrètes « Forme chimique », « Force de la réaction », « Réaction acide/base », « Hydrolyse » et « Log Kow », les classes ont été définies par des experts. L'hydrolyse n'intervenant que lors de la caractérisation de la dégradation des pesticides dans les eaux souterraines, ce paramètre ne sera pas pris en compte lors de l'élaboration de l'indicateur de risque pour les eaux de surface. Le tableau 2 reprend la définition des différentes classes pour chaque variable dans le cas de l'évaluation du risque pour les eaux souterraines (module ResoPest). Un indicateur de pression « physico-chimique » pour les eaux souterraines (ResoPest-physico) sera donc déterminé.

Tableau 2 : Définition des classes floues des variables du module « physico-chimique » pour les eaux souterraines

(Table 2 : Definition of fuzzy classes variables of « physic-chemical » module for groundwater)

VARIABLES	MODALITÉS (Eaux souterraines)	CLASSES
Forme chimique	Ionisée Non ionisée	Favorable (F) Défavorable (D)
Force de la réaction	Forte Faible	Favorable (F) Défavorable (D)
Réaction acide/base	Base Acide	Favorable (F) Défavorable (D)
pKa	pKa = 3 3 < pKa < 9 Pka = 9	Favorable (F) Intervalle de transition (classe floue) Défavorable (D)
Koc (kg.l ⁻¹)	Koc > 1000 100 < Koc < 1000 Koc < 100	Favorable (F) Intervalle de transition (classe floue) Défavorable (D)
DT50 (jour)	DT50 > 120 21 < DT50 < 120 DT50 < 21	Défavorable (D) Intervalle de transition (classe floue) Favorable (F)
Hydrolyse	Instable Stable Très stable	Favorable (F) Moyennement à peu favorable Défavorable (D)
Log Kow	Log Kow > 4 1,5 < Log Kow < 4 Log Kow < 1,5	Favorable (F) Intervalle de transition (classe floue) Défavorable (D)

Pour les eaux de surface (modules ResuPest-RU et ResuPest-ER), il faudra distinguer le transfert des pesticides dû aux phénomènes de ruissellement et d'érosion. Lors du transfert des pesticides par le phénomène d'érosion diffuse, une forte interaction avec les particules de sol (Koc élevé) est défavorable puisque le pesticide est alors emporté par celles-ci. A l'inverse, dans le cas du ruissellement diffus, une faible interaction du pesticide avec les particules de sol (Koc faible) favorisera le transport de la molécule vers les eaux de surface. Deux indicateurs pour les eaux de surface seront donc déterminés, à savoir « ResuPest_RU-physico » et « ResuPest_ER-physico », pour estimer la pression des caractéristiques physico-chimique des pesticides sur les eaux de surface suite, respectivement, au ruissellement diffus et à l'érosion diffuse. Le tableau 3

reprend la définition des différentes classes pour chaque variable dans le cas de l'évaluation du risque pour les eaux de surface.

Tableau 3 : Définition des classes floues des variables du module « physico-chimique » pour les eaux de surface

(Table 3 : Definition of fuzzy classes variables of « physic-chemical » module for surface water)

VARIABLES	MODALITÉS (Ruissellement)	MODALITÉS (Erosion)	CLASSES
Forme chimique	Ionisée Non ionisée		Favorable (F) Défavorable (D)
Force de la réaction	Forte Faible		Favorable (F) Défavorable (D)
Réaction acide/base	Base Acide		Favorable (F) Défavorable (D)
pKa	pKa = 9 3 < pKa < 9 Pka = 3	Pka = 3 3 < pKa < 9 pKa = 9	Favorable (F) Intervalle de transition Défavorable (D)
Koc (kg.l ⁻¹)	Koc > 500 100 < Koc < 500 Koc < 100	Koc < 100 100 < Koc < 1000 Koc > 1000	Favorable (F) Intervalle de transition Défavorable (D)
DT50 (jour)	DT50 > 30 8 < DT50 < 30 DT50 < 8		Défavorable (D) Intervalle de transition Favorable (F)
Log Kow	Log Kow > 4 1,5 < Log Kow < 4 Log Kow < 1,5	Log Kow < 1,5 1,5 < Log Kow < 4 Log Kow > 4	Favorable (F) Intervalle de transition Défavorable (D)

La pression polluante peut donc être décrite sur base de cinq indicateurs pour les trois modules de risques (tableau 4).

Tableau 4 : Synthèse des indicateurs de la pression polluante

Table 4 : Synthesis of pollution pressure indicators

Indicateur de pression	Eaux souterraines	Eaux de surface (ruissellement diffus)	Eaux de surface (érosion diffuse)
Pratiques agricoles	ResoPest-pratic	ResuPest-pratic	
Propriétés physico-chimiques des pesticides	ResoPest-physico	ResuPest_RU-physico	ResuPest_ER-physico

LA SENSIBILITÉ DES SOLS AU TRANSFERT DES PESTICIDES VERS LES EAUX

Trois aspects sont pris en compte lors de la détermination de la sensibilité des sols au transfert des pesticides vers les eaux : le transfert des pesticides vers les eaux souterraines (lixiviation), le transfert des pesticides vers les eaux de surface par ruissellement diffus et par l'érosion hydrique diffuse. Trois indicateurs seront dès lors définis, soit un par module. Les différentes caractéristiques des sols prises en compte pour la détermination des indicateurs de risque pour les eaux souterraines et de surface sont repris au tableau 5.

Tableau 5 : Indicateurs des modules et les variables d'entrée des caractéristiques du sol.
(Table 5 : Indicators of modules and input variable of soil characteristics)

Variable de sensibilité (caractéristique) des sols	Indicateur		
	ResoPest	ResuPest- Ruis	ResuPest- Eros
Concentration en pesticide lixivié	X		
Perméabilité des couches superficielles du sol	X		
Drainage naturel du sol – Etat hydrique	X		
Pierrosité	X		
Perméabilité du substrat sous-jacent	X		
Concentration en pesticide transporté par ruissellement		X	
Concentration en pesticide transporté par érosion			X

Sensibilité du sol au transfert des pesticides vers les eaux souterraines

Le métamodèle MetaPEARL (Tiktak et al., 2006) est choisi pour estimer la concentration en pesticides lixiviés vers les eaux souterraines. MetaPEARL a été mis au point à partir du modèle spatialement distribué (utilisant des paramètres environnementaux spatialisés tels les caractéristiques des sols, le climat, etc.) plus complexe GeoPEARL, et calibré sur base des résultats d'EuroPEARL (version paramétrée de GeoPEARL à l'échelle européenne). Il calcul la concentration ($\mu\text{g.l}^{-1}$) en pesticide lixivié à un mètre de profondeur du sol (profondeur maximale considérée), et qui pourrait donc potentiellement se retrouver dans les eaux souterraines. MetaPEARL a été appliqué et évalué pour la Wallonie (Bah et al., 2011).

Les données relatives aux propriétés physico-chimiques des sols, nécessaires à MetaPEARL, sont issues de la base de données Aardewerk (Van Orshoven et al., 1993 ; Legrain et al., 2005). En tout, 3 733 profils sous culture pour un nombre total de 15 161 horizons pédologiques ont été considérés pour la Wallonie, chaque profil étant caractérisé par plusieurs horizons décrits et analysés au laboratoire. Afin de dériver de ces données ponctuelles (profils), une carte continue des concentrations en pesticides lixiviés vers les eaux souterraines sur l'ensemble des terres agricoles wallonnes, il est nécessaire de les spatialiser. Celle-ci a été réalisée sur base des Unités Cartographiques de Sols (UCS) de la Carte Numérique des Sols de Wallonie (CNSW) (FUSAGx et al., 2006), correspondant aux Unités Typologiques de Sols (UTS) de la Carte « papier » des sols de la Belgique à 1/20 000. Préalablement à cette spatialisation, il faut affecter les profils cultureux Aardewerk aux UCS correspondantes (mêmes caractéristiques morphogénétiques) de la CNSW, sur une base régionale. Pour réaliser ces affectations régionales, la technique par regional class-matching (Van Orshoven, 1993) a été adoptée. L'affectation par regional class-matching permet de considérer les spécificités régionales des sols, notamment géologiques. En d'autres termes, un type de profil pédologique de la base de données Aardewerk n'est affecté qu'aux UCS correspondantes rencontrées dans la même région « géomorphopédologique » d'où provient le profil. Les régions « géomorphopédologiques » utilisées pour l'affectation régionale des profils Aardewerk sont les vingt-quatre Districts de l'Espace Rural (DER), délimités principalement sur base de la CNSW et en tenant compte de la géologie, du relief et des grands traits de l'occupation du sol (Bah et al., 2007). Les profils Aardewerk sont donc affectés aux UCS correspondantes de la CNSW district par district. Les valeurs des variables mesurées en chaque profil Aardewerk sont donc affectées à tous les polygones de la CNSW ayant le même sigle pédologique au sein d'un même DER.

La variable d'entrée climatique du modèle est le flux d'eau net annuel, moyenné sur vingt années de données journalières extraites du système belge de monitoring de rendement des cultures « B-CGMS » (Tychon et al., 2000). Ce flux a été calculé par région agricole, à partir des

valeurs médianes des précipitations et évapotranspiration annuelles à long terme (20 ans) de l'ensemble des grilles météorologiques (10 X 10 km) couvrant chaque région agricole.

Les propriétés des pesticides prises en compte sont le temps de demi-vie (DT50) et le coefficient de partage du pesticide entre la matière organique et l'eau (Kom).

Le modèle MetaPEARL calcul la concentration ($\mu\text{g.l}^{-1}$) en pesticide lixivié à un mètre de profondeur du sol (profondeur maximale considérée), qui pourrait donc potentiellement atteindre les eaux souterraines.

La détermination de la sensibilité du sol au transfert des pesticides vers les eaux souterraines, implique, en plus de la concentration en pesticide potentiellement lixivié à un mètre de profondeur, la prise en compte d'autres caractéristiques des sols jugées pertinentes et décrites par la CNSW, non explicitement valorisées par le modèle MetaPEARL. Il s'agit de la perméabilité des couches superficielles du sol, traduite notamment par leur texture, du drainage naturel du sol, de la charge en éléments grossiers (la pierrosité) et de la perméabilité du substrat sous-jacent. Pour chacune de ces variables, différentes modalités et classes floues sont déterminées de sorte à calculer l'indicateur de sensibilité du sol « ResoPest » du module risque de pollution des eaux souterraines.

Sensibilité du sol au transfert des pesticides vers les eaux de surface par ruissellement diffus ou érosion diffuse

Le risque de transfert des produits phytosanitaires vers les eaux de surface est abordé à travers les deux principaux vecteurs de transport, à savoir le ruissellement (transport du pesticide par l'eau sous forme dissoute) et l'érosion hydrique (transport du pesticide par l'eau sous forme adsorbée) diffuse. La modélisation du transfert des pesticides vers les eaux de surface prend en compte les phénomènes d'adsorption, de désorption et de dégradation des pesticides dans les couches superficielles du sol, qui sont les plus impliqués dans le transfert des produits phytopharmaceutiques par ruissellement et érosion vers la cible « eaux de surface ». La volatilisation du pesticide n'est pas prise en compte par manque de données.

La modélisation du ruissellement diffus est basée sur la méthode S.C.S. (NRCS, 2004) du Département de l'Agriculture des Etats-Unis. Cette méthode a été couramment utilisée et validée en Wallonie, notamment pour produire une cartographie numérique des zones à risque de ruissellement diffus (Demarcin et al., 2009). Le ruissellement diffus est estimé par cette méthode en fonction d'une hauteur d'eau précipitée et d'un paramètre de rétention de l'eau dans le sol, caractérisant le milieu.

La modélisation de l'érosion hydrique diffuse repose sur l'équation universelle de perte en sols modifiée (MUSLE) mise au point par Williams (1975 ; cité par Reichenberger, 2005). Cette équation permet de simuler les pertes en sols sur l'événement pluvieux, en intégrant à la fois le rôle de la pluie et du ruissellement dans l'effet érosif.

La quantité de pesticide transportée par ruissellement ou érosion vers les eaux de surface est ensuite estimée à partir d'équations extraites du modèle PRZM (*Pesticide Root Zone Model* ; Carsel et al., 2003), qui requièrent la hauteur d'eau ruisselée en ce qui concerne le transfert par ruissellement et la perte en sol pour le transport par érosion, pour un événement pluvieux donné. Le modèle « PRZM » simule le mouvement des pesticides sur le sol et aux alentours de la zone racinaire insaturée du sol par ruissellement et érosion. Il fait partie des modèles recommandés par le groupe d'experts européens FOCUS pour la simulation du transfert des pesticides vers les eaux de surface (FOCUS, 2001).

EVALUATION GLOBALE DU RISQUE

L'évaluation globale du risque de pollution des eaux de surface et souterraines est réalisée par l'intégration des évaluations respectives de la pression anthropique (risque intrinsèque lié à l'usage de telle ou telle molécule, aux modalités d'application et période d'application des substances actives), de la sensibilité des sols au transfert des substances actives vers les eaux de surface d'une part, et souterraines d'autre part. Cette agrégation est également réalisée à partir de la définition de règles (clefs) de décessions basées sur la logique floue.

Une analyse de sensibilité du système expert PESTEAX a permis de montrer que les variables affectées d'un poids important dans les clefs décisionnelles des modules ont un impact plus important sur les résultats du système. Plus la variable a été considérée comme importante dans la hiérarchie décisionnelle, plus son impact sur le système est grand. Une analyse d'incertitude associée aux valeurs des indicateurs de risque des différents modules a permis d'estimer l'erreur moyenne associée aux indices de risque, générée par la variation, individuelle ou simultanée, des valeurs prises par les différentes variables des différents modules.

CONCLUSIONS

Un système expert, basé sur un outil SIG, permettant l'évaluation du risque de pollution des eaux de surface et souterraines par les pesticides a été mis au point à partir d'une approche par logique floue. Une enquête de terrain dans deux zones pilotes représentatives du contexte agricole et géomorphopédologique de la Wallonie (Belgique méridionale) a permis de connaître avec précision les pesticides utilisés par les agriculteurs ainsi que les quantités régulièrement apportées. Cette enquête, combinée aux propriétés physico-chimiques des pesticides, a permis d'identifier la pression polluante agricole liée aux propriétés des pesticides et aux activités anthropiques. La sensibilité des sols au transfert des pesticides vers les eaux de surface et souterraines a été évaluée à partir d'un modèle mécaniste simple, appelé MetaPEARL, et de l'interprétation de l'information qualitative fournie par la carte numérique des sols de Wallonie. L'évaluation du risque a ensuite consisté à l'intégration des évaluations spécifiques aux propriétés des pesticides, aux pratiques culturales et à la sensibilité des sols au transfert des pesticides vers les eaux. L'approche par « logique floue » est un outil robuste qui permet non seulement d'agréger de façon uniforme des informations de sources variées, mais aussi d'intégrer l'incertitude (imprécision) associée à certaines données, telles que celles liées aux propriétés physico-chimiques des pesticides ou des sols. Des clefs décisionnelles d'intégration des variables prises en compte, avec des conclusions basées sur des dires d'expert, ont été réalisées. Des classes floues ont été également définies pour chaque variable. Un indice (probabilité) de risque, variant sur une échelle de 0 à 1, est alors défini pour chaque parcelle cultivée, selon la cible considérée (eaux de surface ou eaux souterraines).

Une analyse de sensibilité du système expert a permis de mettre en évidence les variables les plus importantes, qui sont principalement celles affectées d'un poids important dans les clefs décisionnelles construits pour les différents modules du système. Une analyse d'incertitude associée aux valeurs des indicateurs de risque des différents modules a permis d'estimer l'erreur moyenne associée aux différents indices de risque des différents modules.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bah B., Veron P., Lejeune P. & Bock L., 2007. Mise en œuvre de la phase « interprétation » du Projet de Cartographie Numérique des Sols de la Wallonie (P.C.N.S.W.). Rapport final des activités de la convention. Gembloux, Belgique : FUSAGx, Unité Sol – Ecologie – Territoire, Laboratoire de Géopédologie, Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels.
- Bah, B., Vanclooster, M., Oger, R., Bock, L. & Colinet, G. (2011). Valorisation de la Carte Numérique des Sols de Wallonie et d'une base de données disponible en analyse de sol, dans

le cadre de l'évaluation du risque de pollution des eaux souterraines par les pesticides. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **15** (S1), Volume sous presse.

- Barriuso E., Calvet R., Sciavon M. & Soulas G., 1996. *Les pesticides et les polluants organiques des sols. Transformations et dissipation*. Forum « Le sol, un patrimoine menacé ? ». Paris, France, 24 octobre 1996, 18pp.

- Carsel, R.F., Imhoff, J.C., Hummel, P.R., Cheplick, J.M., and Donigan jr., A.S. (2003). *PRZM-3, A model for predicting pesticide and nitrogen fate in the crop root and unsaturated soil zones*. Users Manual for Release 3.12. Center for Exposure Assessment Modeling (CEAM), U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), Athens, GA, USA.

- Commission des Communautés européennes, 2006. *Stratégie thématique concernant l'utilisation durable des pesticides*. COM(2006) 372 final.

- Demarcin, P., Degré, A., Smoos, A. & Dautrebande, S. (2009). *Projet ERRUISSOL. Cartographie numérique des zones à risque de ruissellement et d'érosion des sols en Région wallonne*. Gembloux, Belgique, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Unité d'hydrologie et hydraulique agricole. Rapport final de convention DGO3-FUSAGx (09/05-12/08), 55 pp + annexes.

- FOCUS, 2000. *FOCUS groundwater scenarios in the EU reviw of active substances ; Report of the FOCUS Groundwater Scenario Workgroup*. EC Document Reference Sanco/321/2000 rev.2.

- FOCUS (2001). *FOCUS Surface water scenarios in the EU evaluation process under 91/414/EEC*. Report of the FOCUS Working Group on Surface Water Scenarios, EC Document Reference SANCO/4802/2001-rev.2, 245 pp.

- FUSAGx & MRW-DGA, 2006. *Carte Numérique des Sols de Wallonie (CNSW). Réalisée sur base de la carte des sols de la Belgique à 1/20000, levée sous les auspices de l'IRSIA (Institut pour la Recherche Scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture), 1947-1991*. Gembloux, Belgique : Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux (FUSAGx) ; Namur, Belgique : Ministère de la Région Wallonne – Direction générale de l'Agriculture (MRW-DGA)

- Legrain X., Bock L., Lejeune P. & Rondeux J., 2005. *Etude de faisabilité de la phase « révision partielle » du Projet de Cartographie Numérique des Sols de Wallonie (PCNSW). Evaluation de la base de données Aardewerk. Note de la réunion du Comité d'Accompagnement du 14 septembre 2005*. Gembloux, Belgique : FUSAGx, Unité Sol-Ecologie – Territoire, Laboratoire de Géopédologie, Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels.

- N.R.C.S. (2004). Estimation of direct runoff from storm rainfall. In: *Part 630 Hydrology - National Engineering Handbook*, 10-1 - 10-22 + Appendix.

- Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2006. *Directive 2006/118/CE du parlement européen et du conseil du 12 décembre 2006 sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration*. Journal officiel de l'Union européenne, n°L 372, 1 9-31.

- Reichenberger, S. (2005). *Field-scale risk assessment for diffuse-source pesticide inputs into German surface waters*. Giessen, Justus-Liebig-Universität. Dissertation, 254 pp. ISBN 3-931789-41-1, ISSN 0949-8230.

- Tiktak A., Boesten J.J.T.I., Van der Linden A.M.A. & Van Clooster M., 2006. Mapping ground water vulnerability to pesticide leaching with a process-based metamodel of EuroPEARL. *J.Environ.Qual.*, 35, 1213-1226.

- Tychon B. et al., 2000. *Prévision des productions végétales à l'échelle nationale basée sur un système intégré « modèle agrométéorologique-Téledétection » : analyse de sensibilité et domaine de validité en tant qu'outil d'aide à la décision en politique agricole. Rapport final (Projet B-CGMS)*. Bruxelles : OSTC, Ministère des Classes moyennes et de l'Agriculture ; Mol, Belgique : VITO.

- Van Clooster M. et al., 2004. On the use of unsaturated flow and transport models in nutrient and pesticide management. In: Feddes R.A.E.A.E., ed. *Unsaturated zone modeling*.

Wageningen Frontis Book series 6. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 331-361.

- Van der Werf H.M.G. & Zimmer C., 1998. *An indicator of pesticide environmental impact based on a fussy expert system*. Chemosphere, 36 (10), 2225-2249.

- Van Orshoven J., 1993. *Assessing hydrodynamic land qualities from soil survey data*. PhD thesis: Katholiek Universiteit Leuven, Faculteit der Landbouwwetenschappen, Leuven (Belgium)

- Van Orshoven J. & Vandenbroucke D., 1993. *Guide de l'utilisateur de Aardewerk. Base de données de profils pédologiques. Rapport 18B*. Bruxelles : Institut pour l'Encouragement de la Recherche Scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture (IRSIA), Comité pour le développement d'un système d'informations sur les sols belges (COBIS).